

Predicció del comportament d'estructures de formigó mitjançant models numèrics. Situació actual i tendències de futur.

Antoni R. Mari

DOCTOR ENGINYER DE CAMINS, CANALS I PORTS
PROFESSOR TITULAR DEL DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES
DE L'ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS DE CAMINS, CANALS I PORTS DE BARCELONA.

Durant els darrers decennis el formigó armat i pretensat s'ha fet servir com a material estructural en nombroses construccions, tant de tipus convencional com en obres singulars o de molta envergadura (com ara centrals nuclears, estructures de mar endins, grans edificis, tancs criogènics, ponts de gran llum).

Una estructura de formigó ha de projectar-se de manera que ens en garanteixi el comportament correcte de tal manera que compleixi la funció per a la qual ha estat dissenyada (funcionalitat), durant tota la seva vida útil (durabilitat) i tenint cura del seu aspecte extern i de la seva integració en l'entorn (estètica). Però, a part de la satisfacció d'aquestes condicions de servei, el projecte estructural ha de garantir un cert grau de seguretat entorn del col·lapse de l'estructura o de part d'aquesta.

Per a poder garantir la satisfacció d'aquests estats límits i avaluar el nivell de seguretat amb el qual es dissenya, el projectista ha de conèixer el comportament estructural per a diferents nivells de càrrega, tant en situacions de servei com sota processos incrementals de càrrega, fins arribar al trencament.

Hom pot conèixer de manera aproximada el comportament estructural mitjançant l'experimentació, a partir de la qual és possible desenvolupar models matemàtics capaços de reproduir de forma teòrica el fenomen observat. L'aproximació dels resultats del model al comportament real serà lògicament en funció directa del rigor amb el qual hom hagi plante-

jat les hipòtesis i dels desenvolupaments analítics. Per tant, el primer pas per a poder elaborar un bon model és conèixer el comportament de les estructures, identificant-ne els fenòmens més significatius i les variables que els governen.

Fenòmens més rellevants en el comportament observat de les estructures de formigó armat i pretensat.

El formigó és un material amb poca resistència a la tracció i això hi provoca la formació de fissures quan les traccions superen aquesta resistència. La formació de fissures és un fenomen molt important perquè varia de forma substancial els mecanismes i la capacitat resistents de les estructures i n'afecta la deformabilitat i durabilitat.

La relació tensió-deformació del formigó (en compressió) deixa de ser lineal per a valors relativament petits de la tensió (aprox. el 40% de la seva resistència). El mòdul de deformació longitudinal del formigó és, per tant, variable i funció del nivell de tensions. L'última deformació del formigó en una direcció depèn de la seva qualitat i de l'existència de tensions de confinament. El comportament del formigó sota tensions multiaxials és en general diferent del cas de tensions uniaxials.

El formigó experimenta deformacions en el temps, tant d'origen tensional (fluència) com atensional (retracció, deformacions termohigromètriques). Aquestes deformacions poden provocar moviments inadmissibles (fletxes), pèrdues de la força de pretensat,

redistribució d'esforços, fissures i fins i tot problemes d'inestabilitat diferida. A més, a més, les propietats del formigó varien al llarg del temps.

L'acer és un material el comportament tenso-deformacional del qual pot assimilar-se força aproximativament a un comportament elasto-plàstic. A més, l'acer de pretensat presenta relaxació de tensions en el temps.

Hi ha determinats fenòmens que són propietat del treball conjunt formigó-acer, com la contribució a la rigidesa de l'element del formigó traccionat entre fissures, a causa de l'adherència (normalment imperfecta) entre formigó i acer, i l'avaluació de la qual és important en l'anàlisi de làmines de formigó armat.

Hi ha uns altres fenòmens d'avaluació difícils, com ara l'efecte «passador» de les armadures en una fissura, les quals exerceixen resistència a la cisalla, l'engranament entre les cares de fissures trametent esforços tangencials, etc.

Anàlisi de la situació actual del projecte d'estructures de formigó armat i pretensat.

Com a deducció del comportament descrit abans, comprovem que el formigó armat i/o pretensat no és precisament un material elàstic, isòtrop i homogeni, hipòtesis usuals de la resistència de materials, per més que pot ésser assimilat a un material d'aquestes característiques quan encara no s'hi han produït fissures. Per a situacions de servei en peces armades i en situacions pròximes al

col·lapse, les estructures tant de formigó armat com les de preten-sat es comporten de manera sen-siblement diferent a la prevista se-gons una anàlisi lineal elàstica, cosa constatable en proves de mo-dels, sota nivells incrementals de càrrega.

La filosofia de disseny actual-ment acceptada per al projecte d'estructures de formigó armat (mètode dels estats límits) admet, per a obtenir els esforços (sol·lici-tació), la utilització de mètodes elàstics. Tanmateix, per al càlcul de la resposta estructural (esforços últims, per exemple), hom propo-sa la utilització de models que es-tiguin més d'acord amb l'estat lí-mit últim (diagrama $\sigma - \epsilon$ no lineals, formació de fissures, etc.)

Així, en la inequació de compro-vació Sol·licitació \leq Resistència comparem dues magnituds obtin-gudes amb criteris diferents, la qual cosa resulta, com a mínim, in-coherent.

A més, en no saber amb exacti-tud el valor dels esforços en tren-cament, no coneixem el nivell de seguretat estructural. Fins i tot en situacions de servei hom pot co-metre errors importants, com és el cas de l'avaluació de les deforma-cions (fletxes) en peces de formi-gó armat.

En aquestes circumstàncies, ens podem preguntar fins a quin punt i en quin sentit hi ha errors en

el procés actual de dimensiona-ment i quines repercussions hi po-den tenir.

Com a conseqüència del com-plex comportament del formigó ar-mat (no lineal), si les estructures són hiperestàtiques, solen tenir una adaptació plàstica, la qual pro-vo-ca redistribucions d'esforços, que en moltes ocasions es poden entendre com una «reserva de re-sistència». La diferència entre els esforços calculats linealment i en règim no lineal pot oscil·lar en va-lors pròxims a un 20-25% dels va-lors lineals per a accions de tipus càrrega, i fins i tot superiors per a accions indirectes (temperatura, seients de suport); la solució lineal generalment és conservadora. Tot això, unit a les recomanacions pràctiques de disseny i construc-ció (quanties i dimensions míni-mes, etc.), normalment conservado-res, fa que, per bé que el nivell de seguretat estructural no és gaire co-negut, hi sigui suficientment alt.

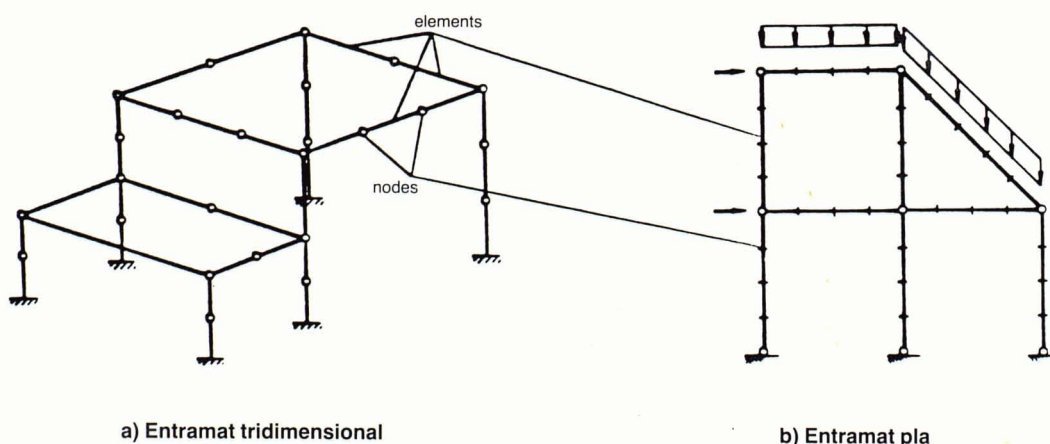
En el cas d'estructures conven-cionals, una anàlisi estructural més afinaada podria dur a una re-ducció del cost de l'estructura i a una possible reducció de patolo-gies posteriors, encara que la seva utilització en projecte actualment no sembli justificada des d'un punt de vista econòmic, i hi sigui potser més important tenir cura dels de-talls del projecte i la construcció.

Tanmateix, en el cas de voler avaluar la resposta estructural res-pecte a accions extraordinàries no previstes en disseny o a la capaci-tat portant d'estructures amb una patologia observada (per exemple, l'esquerdament) convé d'utilitzar models d'anàlisi realistes.

En el cas d'estructures de gran envergadura, amb tecnologia com-plexa i de cost elevat, és essencial cercar dissenys, materials i tècni-ques de construcció alternatives, sense disminuir-ne les condicions de seguretat. Paral·lelament a l'in-crement de l'escala, hi ha el co-rresponent augment de la seriosi-tat de les conseqüències d'un possible desastre, i per això és cada vegada més necessari fer una anàlisi detallada de la segure-tat estructural. Endemés, en el cas de tipus estructurals nous, en què hi ha manca d'experiència, no hi sol haver regles de disseny estan-daritzades o codis específics, i la realització de proves en un model sovint és impracticable. Per a po-der tenir un projecte d'aquestes estructures que en garanteixi la se-guretat, és essencial tenir inform-a-ció del seu comportament sota càrregues de gran magnitud, i assolir el col·lapse estructural.

En aquests casos sí que podem afirmar que un dimensionament basat en un càlcul lineal elàstic pot portar a errors greus i difícils de detectar, per tal com el funciona-

Figura 1.



ment estructural a nivells de càrrega alts de tipologies no convencionals pot escapar-se a la lògica i a la intuïció de l'enginyer projectista.

Models numèrics per a la simulació del comportament estructural: característiques i classificació.

La realització de proves amb models a escala ha estat, fins fa poc, la via més emprada d'aproximació al comportament d'estructures complexes (preses, làmines, etc.). En l'actualitat, la realització d'aquestes proves és cara i complicada. Passa també que una prova fins al trencament només es pot realitzar una vegada, ja que el model queda destruït o seriosament fet malbé.

Actualment, el desenvolupament informàtic, les tècniques numèriques i l'avenç en el coneixement del comportament dels materials (fent-ne assaigs relativament senzills) han permès de desenvolupar models matemàtics capaços d'incorporar, en gran mesura, els fenòmens més significatius del comportament de les estructures de formigó armat i pretensat. A causa de la complexitat dels models els càlculs que cal fer per a saber-ne la resposta a una sol·licitació determinada només poden efectuar-se mitjançant ordinadors.

Per a verificar el funcionament correcte del model matemàtic és imprescindible sotmetre'l a proves. Tanmateix, una vegada el model està a punt, hom pot estendre'n la utilització a estructures amb dimensions diverses, vinculacions, hipòtesis de càrrega i fins i tot materials amb propietats diferents, simulant tantes vegades com es vulgui el comportament estructural. En aquest sentit, podem dir que els models numèrics poden ser un complement excel·lent (i a vegades, un substitutiu) de les proves tan cares de laboratori, i es poden fer servir de forma sistemàtica per a la realització d'estudis paramètrics i treure'n conclusions de cara al disseny.

Els models numèrics d'anàlisi més desenvolupats en l'actualitat es basen en la tècnica dels elements finits, l'aplicació dels quals a l'anàlisi d'estructures de formigó es realitzà per primera vegada l'any 1967 (Ngo i Scordelis, (1)). Des d'aleshores, han estat estudiades nombroses tipologies estructurals (bigues, plaques, plafons, làmines, sòlids tridimensionals, ponts en caixot, etc.).

Els models es poden fer servir per a l'estudi de fenòmens locals, com a zones d'ancoratge de pretensat, comportament de nusos, etc., o bé per a l'estudi del comportament global de l'estructura, captant-ne els efectes no lineals dominants.

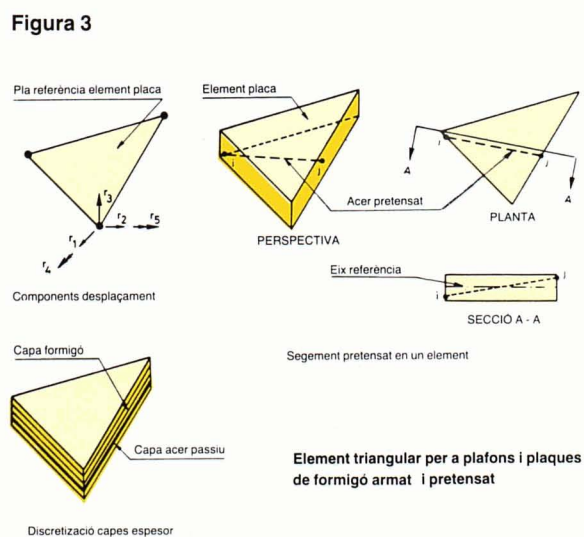
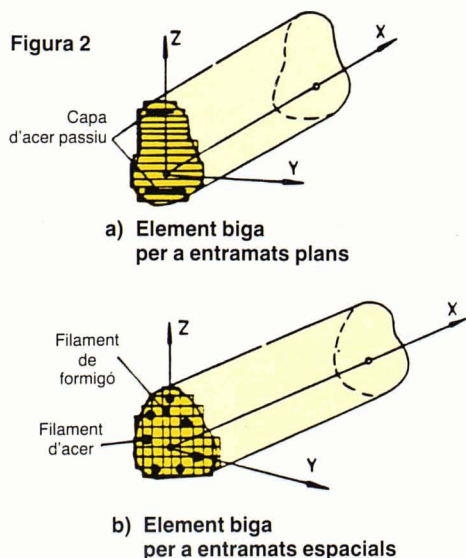
Descripció d'alguns models d'anàlisi no lineal d'estructures de formigó.

Caracterització de la geometria. Entramats.

Aquest tipus d'estructures (figures 1a i 1b) poden ser analitzades amb tot rigor mitjançant models d'anàlisi no lineal basats en mètodes matricials generalitzats, o bé mitjançant elements finits unidimensionals, com els que mostren les figures 2a i 2b

La secció transversal es divideix en capes (flexió recta) o en fibres (flexió esbiaixada) per poder caracteritzar l'estat de cada punt de la secció, en funció del seu nivell de tensions i obtenir-hi la rigidesa de l'element com a contribució directa de les rigideses individuals de les fibres. Les armadures passives es modelen mitjançant barres rectes d'acer, encloses en el formigó, la rigidesa del qual se suma directament a la rigidesa de l'element. S'hi considera adherència perfecta entre formigó i acer.

Els tendons de pretensat es consideren poligonals, amb trams rectilinis dins cada element, de tal manera que en fer l'operació de tensat la seva interacció amb l'estructura consisteix en una sèrie de càrregues puntuals aplicades en els nodes. Alguns dels models existents incorporen les pèrdues



de pretensat per penetració de falca o ancoratge, fregament paràsit i fregament en corba (pel que fa a pèrdues instantànies). La resposta torsional es considera no lineal, generalment desacoblada de la flexió, mitjançant la utilització de diagrames Torsor-curvatura torsional no lineal, obtinguts de models simples o mitjançant l'experimentació.

Plaques.

Per a la seva modelització es divideix l'estructura en elements finits triangulars, rectangulars o isoparamètrics amb configuracions diferents pel que fa al nombre de nodes (figura 3). Els graus de llibertat més significatius són els girs d'eix contingut en el pla mitjà i el desplaçament normal a aquest. Tanmateix, la formació de fissures i els altres efectes no lineals poden generar esforços de membrana importants (continguts en el pla mitjà), per la qual cosa habitualment es consideren també els graus de llibertat corresponents a aquell estat. Aquest tipus d'element finit és vàlid per a l'anàlisi de plafons (bigues paret, per exemple) o per l'estudi d'elements estructurals que es troben sotmesos a estats de tensió o deformació plana (estudis de bigues com a elements bidimensionals, per exemple).

La secció transversal de l'element se subdivideix en capes, com

en el cas de les bigues. Per obtenir la rigidesa de l'element i, en general, la seva resposta estructural s'avaluen les tensions en punts d'integració determinats (punts de Gauss), el nombre i distribució dels quals els predetermina el tipus d'element. L'armadura passiva, que és formada generalment per malles octogonals de barres d'acer, es modelitza mitjançant capes d'acer de gruix fictici equivalent. Els tendons de pretensat poden modelar-se per cables poligonals, constituïts per segments rectilinis dins de cada element. Les càrregues de pretensat han de traslladar-se als nodes mitjançant una formulació adequada.

Làmines.

Per a l'anàlisi de làmines, en les quals es produeixen grans esforços de membrana juntament amb flexions, hom pot fer servir els mateixos elements descrits per a l'anàlisi de plaques, encara que la més bona adaptació a la geometria corba de l'estructura requereix la utilització d'elements corbs i isoparamètrics amb un nombre elevat de nodes (figura 4). La discretització per capes de la secció transversal i la modelització de l'acer passiu són idèntiques al cas de les plaques (làmines planes).

Els tendons de pretensat però, presentaran curvatures no menyspreables a l'interior de l'element,

per això convé definir-los per corbes, generalment mitjançant tractaments paramètrics. En el cas de plaques i làmines, s'hi poden incloure les bigues de vorell mitjançant elements finits unidimensionals, alhora que la seva connexió a la làmina mitjançant bieles rígides.

Sòlids tridimensionals.

El desenvolupament de solucions numèriques per a sòlids axisimètrics i tridimensionals de forma genèrica ha estat lligat en gran part al de recipients de contenció per a centrals nuclears i plataformes «off shore». El tipus d'elements desenvolupats (Argyris (2)) són elements sòlids isoparamètrics per a representar el formigó, elements membrana (prims) per a l'acer passiu, elements discrets tipus cable corb per a tendons de pretensat i elements discrets de connexió per a representar els lliscaments relatius entre formigó i acer per adherència imperfecta (figura 5).

Aquest tipus d'elements, per la seva àmplia avenència, són aplicables a l'estudi de qualsevol fenomen tridimensional o efecte local, com ara el punxonament de plaques o com el comportament de bigues sotmeses a esforços combinats de flexió-compressió-tallant i torsió.

Figura 4

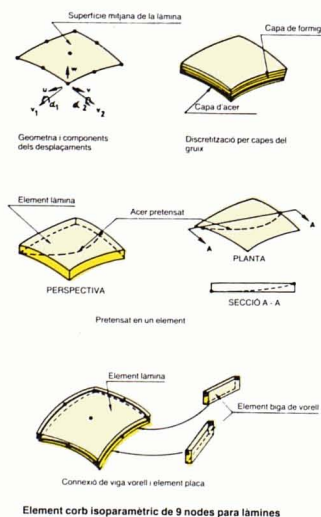
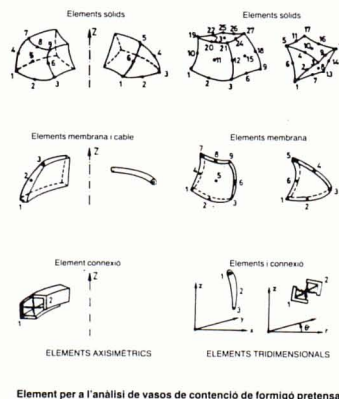


Figura 5



Elements especials derivats dels anteriors.

Mitjançant la combinació dels elements anteriors, o per subestructuració o addició de nous graus de llibertat es fa possible d'obtenir elements especials per a l'anàlisi de determinades tipologies estructurals, com és el cas de ponts de secció en caixa.

Per una altra banda, determinats sistemes estructurals exigeixen, per a fer-ne l'anàlisi, la combinació de tipus diferents d'elements, cada un dels quals és capaç de captar un comportament dominant. És així (figura 6) que l'anàlisi de plaques descansant en suports requerirà la utilització d'elements tridimensionals a les zones pròximes als suports (on l'esforç tallant té importància), on poden emprar-se elements placa o làmina a les zones allunyades i elements de transició intermedis.

Les figures 6,7,8 i 9 presenten exemples d'aplicació dels tipus diversos d'elements descrits anteriorment

Models dels materials.

En els elements tipus biga, hom suposa que el formigó és sotmès fonamentalment a tensions longitudinals, en què s'empren les relacions tensió-deformació uniaxials en règim no lineal: diagrames parabòlics amb branques de càrrega

i descàrrega, comportament post-vèrtex amb caiguda, zona de tracció lineal fins arribar a formació de fissures fins i tot en models més complexos.

En el cas de plafons, plaques i làmines, l'estat tensional fonamental del formigó és biaxial, i cal definir-hi una superfície de trencament en funció de les tensions en les dues direccions principals, ja siguin de compressió o de tracció, com també les relacions tenso-deformacionals en qualsevol direcció (figures 10a i 10b). Els models constitutius desenvolupats fins ara per al comportament biaxial dels formigó poden agrupar-se en: Models basats en l'elasticitat no lineal (hipoelàstics i hiperelàstics), Models basats en la plasticitat, Models endocrònics i Models basats en la teoria de la plasticitat més fractura

Alguns dels models constitutius anteriors tenen un caràcter tridimensional, per la qual cosa són aplicables a l'estudi de sòlids tridimensionals.

L'esquerdament en el formigó sotmès a tensions multiaxials, cal representar-lo de manera adequada, modelitzant l'obertura i tancament de fissures en direccions diverses, alhora que la transmissió dels esforços tangencials mitjançant l'engranatge entre les cares internes de les fissures.

Hom sol modelar l'acer com un material elasto-plàstic (armadures passives) o multilinear (armadures actives), amb branques de descàrrega. També pot ser tinguda en compte la relaxació de l'acer de pretensat encara que no estigui sotmès a deformació constant.

Per al treball conjunt formigó-acer, hi ha models que representen la col·laboració del formigó tractionat entre fissures, incloent-la ja sigui en el comportament a tracció del formigó, ja sigui en la tensió que l'acer absorbeix, i fins i tot considerant com a paràmetre important la pèrdua d'adherència entre tots dos materials

El mètode dels elements juntes, en la seva formulació en desplaçament, duu al plantejament d'un sistema d'equacions, generalment no lineals de la forma.

$$k(r) \cdot r = f$$

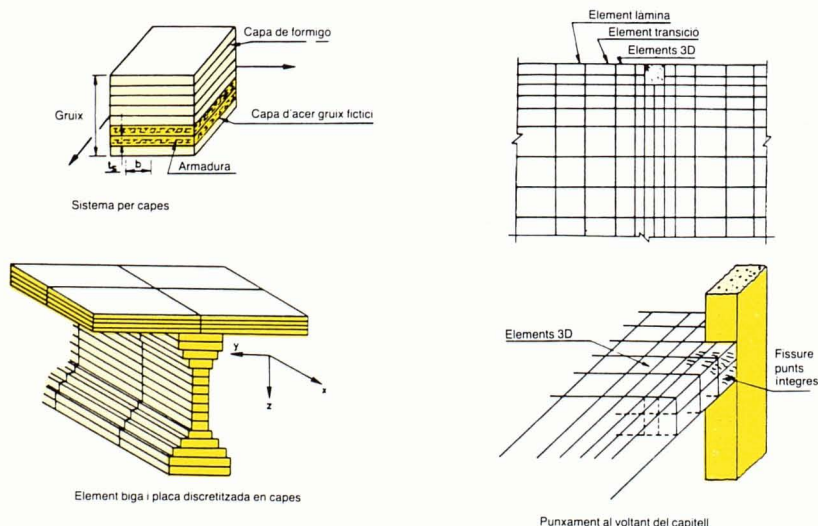
on $k(r)$ és la matriu de rigidesa global de l'estructura

r és el vector de desplaçaments nodals.

f és el vector de càrregues nodals.

Per a resoldre aquest sistema (no lineal principalment per les propietats dels materials, en el cas d'estructures de formigó, o per consideracions geomètriques), cal procedir mitjançant tècniques iteratives, incrementals o mixtes, fins

Figura 6



aconseguir una solució que satisfaci les condicions dels anàlisis abans esmentades. Hi ha una descripció detallada d'aquestes tècniques a la referència (15). En estructures de formigó, convé valer-se de tècniques incrementals amb iteracions d'equilibri en cada esglaió de càrrega, amb la finalitat de detectar-hi les fases elàstica, fissurada i d'esgotament estructural.

Per una altra banda, per a conèixer el comportament de l'estructura durant tota la seva vida útil, cal fer una anàlisi pas a pas en el temps, discretitzant-lo en intervals de temps i incloent-hi la història de càrregues i temperatures a què hom preveu que estarà sotmesa l'estructura.

Viabilitat de l'aplicació actual dels models numèrics descrits i tendències de futur.

En l'estat actual de la tècnica de la construcció d'estructures en el nostre país (disseny, càlcul, execució i manteniment), no sembla justificada l'adopció de models matemàtics molt complexos per al dimensionament o verificació del comportament estructural, perquè suposa un cost (disponibilitat de mitjans informàtics, programes d'ordinador, tècnics qualificats, etc.) desproporcionat respecte als beneficis que se n'obtidrien, excepte en situacions molt específiques

que impliquessin un risc molt alt o una garantia de reduccions importants en el cost global de l'estructura.

Malgrat tot, hi ha una sèrie de factors que, en un futur no gaire llunyà, afavoreixen la utilització cada vegada més freqüent de models afinats d'anàlisi estructural. D'entre tots, en podem citar: la ràpida evolució dels sistemes informàtics, cada cop més potents i econòmics i, per tant, a l'abast de l'enginyer de projecte, la major disponibilitat, cada cop més, de models de comportament refinats, alhora però, que intel·ligibles i fàcils d'adaptar a programes estàndard existents, l'augment del nivell d'exigència de qualitat en la construcció mitjançant, per exemple, les disposicions en les normatives que apareguin com a conseqüència de la utilització d'aquests models, la necessitat d'optimitzar el disseny estructural en termes econòmics i la tendència natural d'adaptació de la tecnologia de la construcció al coneixement cada dia més gran del comportament de les estructures i dels materials que les formen.

Fa alguns anys, el disseny d'estructures de formigó es basava en mètodes de tensions admissibles, amb una concepció de la seguretat que avui ja ha estat superada.

A hores d'ara, els mètodes de fractura, a nivell secció, s'han im-

posat, i és normal de fer-los servir en qualsevol oficina de projectes. Ens falta fer un pas endavant pel que fa a l'anàlisi estructural; per això, no és desassenyat pensar que en un futur proper podrem emprar de forma natural models complexos d'anàlisi estructural capaços de predir, almenys amb més rigor que els actuals, el comportament de les estructures que dissenyem.

Conclusions.

De tot plegat, en podem deduir que:

- Els procediments de càlcul actuals no reflecteixen amb rigor el complex comportament de les estructures de formigó, especialment en situacions d'estat límit últim.
- No coneixem, per tant, rigorosament, el grau de seguretat amb què són dissenyades les estructures, encara que hi considerem les accions i resistències i els altres paràmetres estructurals deterministes.
- En l'actualitat, hi ha models d'anàlisi capaços de reflectir amb una aproximació bona el comportament no lineal de les estructures de formigó.
- És previsible que en un futur no gaire llunyà sigui usual l'aplicació d'aquests models avançats d'anàlisi en el procés de disseny.

Les estructures de formigó armat i pretensat, subjectes a tots els factors aquí exposats, poden incloure's entre les estructures més complexes que podem trobar. Tanmateix, cal no oblidar que l'objectiu final de l'anàlisi és produir un disseny satisfactori en termes de servei i de seguretat estructural. Un projectista ha de ser capaç d'assegurar, per si mateix, que els efectes predominants són precisament els que hi són considerats; l'elecció adequada d'un model de comportament que els hi inclogui, encara que ignori algunes altres contribucions complexes d'importància menor, pot ser un gran ajut en el disseny estructural. La capacitat de determinar què és important i què no ho és, és possiblement el distintiu del bon enginyer.

A.M. □

Figura 8

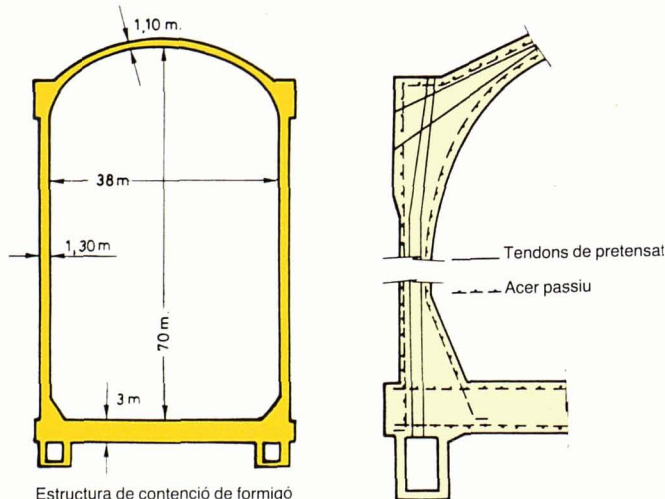


Figura 7

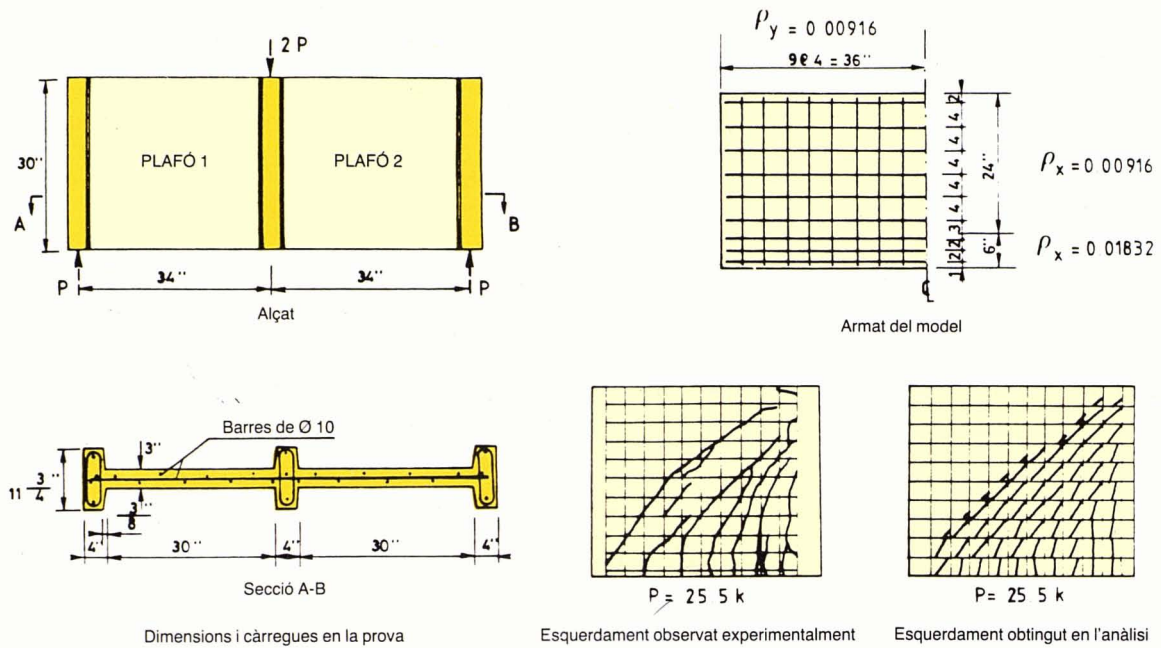


Figura 9

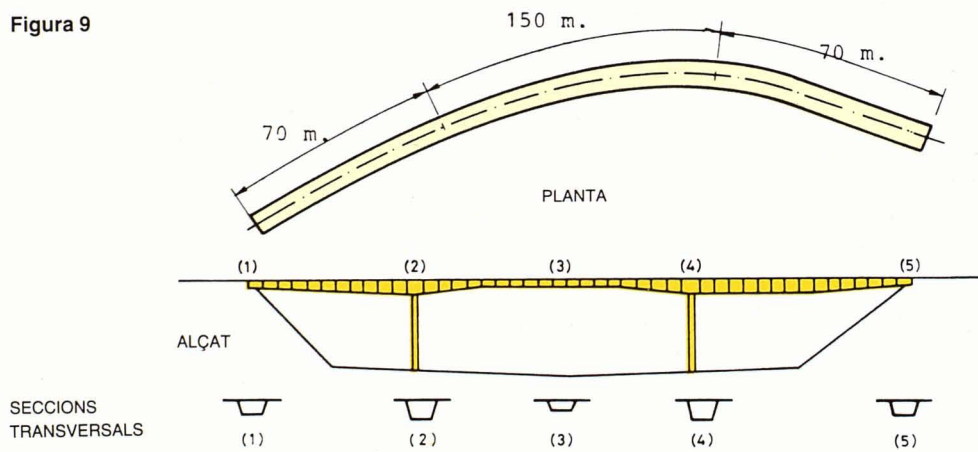


Figura 10

